

不同基因型水稻氮利用效率的差异及评价^{*}

张亚丽 樊剑波 段英华 王东升 叶利庭 沈其荣[†]

(南京农业大学资源与环境科学学院,南京 210095)

摘 要 随着人们对农田氮肥过量施用导致肥料利用率下降和环境污染等问题认识的逐渐加深,不同基因型水稻氮营养效率的研究得到了普遍重视。采用 177 个粳稻基因型在两个施氮水平下进行田间筛选试验来评价水稻的产量、吸氮量和氮素生理利用效率的变异情况。结果表明,随着供氮水平的增加,水稻的产量和吸氮量随之增加,氮生理利用效率却随之降低;在相同的供氮水平下,不同水稻基因型之间的产量、吸氮量和氮生理利用效率存在显著差异。根据水稻在两个供氮水平下的产量水平把水稻分为四个类型:双高效型、低氮高效型、双低效型和高氮高效型。氮高效基因型可描述为在不同供氮水平下都有较高的产量,同时意味着氮高效品种能吸收大量的氮或有较高的氮生理利用效率。水稻成熟时较低的秸秆氮浓度可表明水稻具有较高的氮生理利用效率。

关键词 水稻;氮利用效率;氮生理利用效率;差异;评价
中图分类号 S511 **文献标识码** A

我国农业已进入一个作物生产、农产品品质和环境保护并重的多目标时期。氮素是农业生产中投入最多的养分元素,氮对水稻生产的影响仅次于水,但却构成水稻生产成本投入的主要部分。中国水稻种植面积占世界水稻种植面积的 20%,然而中国水稻氮肥用量占全球水稻氮肥总用量的 37%。中国稻田单季水稻氮肥用量平均为 180 kg hm⁻²,这一用量比世界稻田氮肥单位面积平均用量大约高 75%左右^[1]。在中国氮肥成本占水稻生产外部投入总成本的份额高达 35%。氮肥施入土壤后如果不能被作物吸收,就会造成大量损失而产生一系列的环境问题^[2,3]。

作物对氮的吸收和利用是农业生态系统中氮循环的两个重要过程。充分挖掘作物吸收利用氮的遗传潜力,从而在一定的氮肥投入下获得较高的产量,并减少氮在土壤中的残留,是提高氮肥利用率的重要途径之一。而遗传改良的先决条件是了解控制作物高效利用氮的关键生理过程。氮利用效率(N use efficiency, NUE)定义为作物籽粒产量除以供氮量^[4],包括氮素吸收效率和生理利用效率两个构成因素。在氮吸收方面,氮高效的水稻品种吸氮较多是由于具有较大的根系。在水稻生产中根系形态参

数可能是决定其是否高效吸收氮营养的决定性因素;在氮利用方面,蒋彭炎和江立庚等^[5~7]认为齐穗期后氮的转运和齐穗期后的碳素积累对水稻体内的氮生理利用效率高起到非常重要的作用。大量研究表明,水稻的氮素利用效率及其构成因素存在着显著的基因型差异^[8~12],Singh 等^[9]研究发现,随供氮水平的增加而氮素利用效率及其构成因素随之降低。与吸收效率相比,氮素的生理利用效率是比较稳定的,随供氮水平的增加其降幅小于吸收效率的降幅,所以吸收效率的降低是氮素利用效率降低的主要原因。但不同基因型水稻氮素利用效率及其构成因素降低的幅度并不相同。水稻氮效率育种方面,我国对水稻氮营养高效种质资源的收集、筛选和鉴定工作和氮效率的生理生化基础研究和氮高效的遗传工作做得较少。这是因为水稻氮高效品种的选育需要耗费大量的时间与精力,如果在选择产量的同时加上一些与产量密切相关的次级性状,则可以大大增加选择效率。因此,从我国可持续农业的角度出发,挖掘水稻氮高效的种质资源,进一步研究氮效率的生理系列化基础,并通过遗传改良培育氮高效品种已成为当务之急。

本研究以国内外几十年来育成的或正在选育的

^{*} 国家自然科学基金重大项目(30390080)和国家自然科学基金项目(30771290)资助

[†] 通讯作者, E-mail: shenqirong@njau.edu.cn, Tel: 025-84395212

作者简介:张亚丽(1971~),女,博士,副教授,主要从事水稻氮肥高效利用。E-mail: ylzhang@njau.edu.cn

收稿日期:2006-10-16;收到修改稿日期:2006-12-12

177 个粳稻为供试材料,在两个供氮水平下研究了不同基因型水稻产量、吸氮量和氮生理利用效率的变异情况,以期深入了解不同基因型水稻产量的不同是由氮高效吸收还是其体内高效生理利用引起的,进而把他们划分为若干类型。

1 材料与方法

1.1 供试材料

收集我国 140 个和其他国家 37 个(其中意大利 10 个,韩国 9 个,日本 8 个,美国、朝鲜和菲律宾各 2 个,孟加拉国、科特迪瓦、南斯拉夫和巴西各 1 个)粳稻品种(品系)共 177 个,这些水稻品种具有不同的遗传背景和农学性状,其中 71 个属于中熟型水稻,生育期在 130~150 d;106 个属于晚熟型水稻,其生育期在 151~172 d。

1.2 试验地点

试验在南京农业大学江浦试验站进行。土壤为长江冲积物上发育的水稻土,经多年的机械化作业,地力较为一致,土壤的基本性状为:pH(1:1 水土比)7.6,有机质 6.49 g kg⁻¹,全氮 0.88 g kg⁻¹,速效氮 12 mg kg⁻¹,速效磷 15 mg kg⁻¹,速效钾 140 mg kg⁻¹。

1.3 试验设计及方案

2 个氮肥处理分别为不施氮肥(CK)和施用氮肥水平为 180 kg hm⁻²(+N)。施氮处理分别在水稻移栽前、分蘖期(移栽后 1 周)、拔节期和抽穗前期施用,氮肥用量为 N 54、54、36 和 36 kg hm⁻²。所有的处理磷、钾肥一致,磷肥用量为 P 35 kg hm⁻²(肥料为过磷酸钙)、钾肥用量为 K 130 kg hm⁻²(肥料为氯化钾),均作基肥施用。

试验为裂区设计,氮肥处理为主处理,不同生育期(中熟和晚熟)水稻品种作为副处理,3 个重复,共裂分为 12 个小区,小区间的田埂用塑料薄膜隔开(垂直埋深 30 cm);每一小区内每个水稻品种的种植面积约为 1 m²(株距×行距为 15 cm×20 cm,一穴一苗,共 30 穴),共裂分为 1 062 个微区;177 个水稻品种同一时间(5 月 12 日)播种于育苗盘进行早育秧苗,30 d 后开始依次移栽中熟和晚熟水稻。多余的秧苗放在插秧下,1 周内补苗,在各自的关键生育期进行施肥,其他的田间管理一致。

1.4 测定项目与方法

水稻成熟后从小区中间一行采集生长一致的 5 穴水稻植株(避免边际效应),测定秸秆产量、籽粒产量、籽粒和秸秆含氮量,另外记录测定水稻的生育

期。土壤的基本理化性质和植株体氮含量的测定均采用常规方法^[13]。

1.5 数据计算及分析处理

氮素生理利用效率指单位植株吸收的氮素所形成的籽粒产量。数据统计采用 SPSS 统计软件分析。

2 结果与分析

2.1 水稻氮吸收和生理利用效率的基因型差异

与不施氮肥的处理相比,随着氮肥的施用中熟水稻的生育期随之平均延长 2.8 d,而随着氮肥的施用晚熟水稻的生育期平均增幅为 5.2 d。相关分析表明,水稻的生育期与其产量、生物量和氮生理利用效率均呈极显著的正相关关系;而水稻生育期与籽粒和秸秆氮浓度呈极显著的负相关关系(表 1)。

表 1 在两个供氮水平下的水稻生长参与水稻生育期的相关系数

参数 Parameter	相关系数 Coefficient	
	CK	+N
产量 Grain yield	0.798 **	0.508 **
生物量 Biomass accumulation	0.674 **	0.330 **
氮积累量 N accumulation	0.214 **	0.114
氮生理利用效率 Physiological N use efficiency	0.827 **	0.5136 **
籽粒氮浓度 N concentration in grain	-0.718 **	-0.591 **
秸秆氮浓度 N concentration in straw	-0.778 **	-0.414 **
籽粒氮积累量 N accumulation in grain	0.679 **	0.132
秸秆氮积累量 N accumulation in straw	-0.572 **	-0.132

注: **表示 1% 水平显著 Note: **, significant at 1% level

从表 1 可看出,水稻生育期与植物生长参数的相关系数在不施氮时均较施用氮肥时的大。在不施氮时 53% 的晚稻产量均较中稻中的最高产量高;当施氮水平为 180 kg hm⁻²时,106 个晚稻品种中只有 3 个水稻的产量较中稻中的最高产量高。这表明水稻的产量在供氮水平较低时较大程度地依赖于其生育期。从表 1 还可看出,在不施氮时水稻吸氮量与生育期呈极显著正相关关系,当施用氮肥水平为 180 kg hm⁻²时他们的正相关关系反而不密切,这可能是由于生育期越长,水稻植株往往对体内氮的再利用程度依赖就越强。

方差分析结果表明,除中熟水稻的氮生理利用效率外,其他参数均与水稻品种、氮水平及其相互作用

有极显著的关系(表 2)。随着氮肥的施用,水稻的产量、生物量、籽粒和秸秆吸氮量、籽粒和秸秆的氮浓度增加,而氮生理利用效率却随之下降。在同一供氮水平下,不同基因型水稻的产量、氮吸收和生理利用效

率表现出明显的差异。例如对晚稻产量而言,在不施氮肥时其变化幅度为 209 ~ 607 g m⁻²,其平均值为 410 g m⁻²;当施用氮肥后产量的幅度在 323 ~ 891 g m⁻²,其平均值为 476 g m⁻²,增幅为 16 %左右。

表 2 水稻氮吸收与利用的基因型差异

Table 2 Variation of N uptake and utilization of rice with genotype

参数 Parameter	范围 Range		平均数 Average		方差分析 ANOVA			变异系数 CV (%)
	CK	+N	CK	+N	品种 Genotype	氮肥 N rate	G × N	
中稻 Semilate rice								
产量 Grain yield (g m ⁻²)	67 ~ 406	247 ~ 595	203	372	**	**	**	46.5
生物量 Biomass accumulation (g m ⁻²)	441 ~ 1 026	972 ~ 1 720	711	1 057	**	**	**	28.7
氮积累量 N accumulation (g m ⁻²)	4.97 ~ 11.0	8.15 ~ 19.1	7.55	13.6	**	**	**	38.6
氮生理利用效率 Physiological N use efficiency (kg kg ⁻¹)	12 ~ 48	10 ~ 40	32	26	**	ns	**	23.0
籽粒氮浓度 N concentration in grain (%)	1.06 ~ 1.90	1.10 ~ 2.34	1.43	1.65	**	**	**	14.7
秸秆氮浓度 N concentration in straw (%)	0.61 ~ 1.37	0.70 ~ 1.59	0.93	1.13	**	**	**	21.3
籽粒氮量 N accumulation in grain (g m ⁻²)	0.96 ~ 5.72	2.28 ~ 12.0	3.26	6.60	**	**	**	47.8
秸秆氮量 N accumulation in straw (g m ⁻²)	2.75 ~ 7.12	4.42 ~ 11.9	4.71	7.67	**	**	**	33.7
晚稻 Late rice								
产量 Grain yield (g m ⁻²)	209 ~ 607	323 ~ 743	410	476	**	**	**	22.0
生物量 Biomass accumulation (g m ⁻²)	603 ~ 1 330	1 129 ~ 1 910	894	1 178	**	**	**	24.6
氮积累量 N accumulation (g m ⁻²)	4.95 ~ 11.0	2.87 ~ 23.6	8.01	13.3	**	**	**	33.3
氮生理利用效率 Physiological N use efficiency (kg kg ⁻¹)	23 ~ 90	22 ~ 80	51	36	**	**	**	19.0
籽粒氮浓度 N concentration in grain (%)	0.90 ~ 1.42	1.08 ~ 1.75	1.14	1.39	**	**	**	13.8
秸秆氮浓度 N concentration in straw (%)	0.49 ~ 1.11	0.33 ~ 1.43	0.71	0.99	**	**	**	23.8
籽粒氮量 N accumulation in grain (g m ⁻²)	2.08 ~ 6.45	1.54 ~ 12.8	4.57	6.48	**	**	**	28.9
秸秆氮量 N accumulation in straw (g m ⁻²)	2.15 ~ 5.96	1.79 ~ 12.1	3.44	6.95	**	**	**	44.8

注: **表示 1 %水平显著。Ns, 不显著 Note: ** significant at 1 %level. ns: not significant

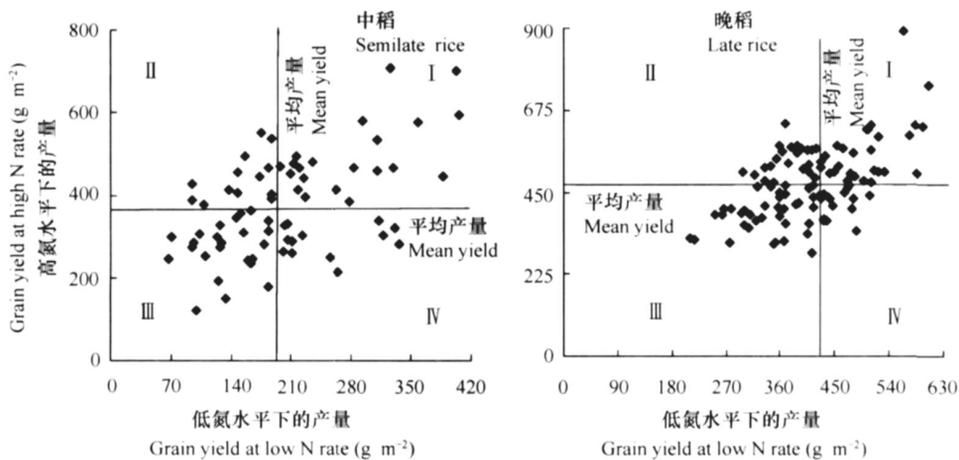


图 1 不同氮效率水稻的分布图

Fig. 1 Distribution of the rice cultivars different in N use efficiency

注: , 双高效型; , 高氮高效型; , 双低效型; , 低氮高效型 Note: , Efficient-efficient cultivars; , Inefficient-efficient cultivars; , Inefficient-inefficient cultivars; , Efficient-inefficient cultivars

2.2 不同基因型水稻的氮素利用效率评价

氮利用效率定义为作物籽粒产量除以供氮量,由于介质供氮量(包括土壤有效氮和肥料氮量)比较难于计算,在统一供氮水平时作物(相同生育期)产量可表征为氮利用效率;当不论介质供氮水平如何,水稻的产量均高于其同一生育期的水稻平均产量时,该水稻即可定义为氮高效基因型;反之则定义为氮低效基因型^[9]。根据 71 个中熟水稻和 106 个晚熟水稻基因型在两个供氮水平下的产量平均值可将其分为四个类型(见图 1):(1)双高效型(Efficient-efficient),此类基因型在低氮和高氮水平下的产量均高于供试基因型的平均值,位于图中的 I 区,双高效型中稻包括玉田大白芒、80-4 等 20 个基因型,双高效型晚稻包括 4007、南光等 35 个基因型。(2)高氮高效型(Inefficient-efficient),此类基因型在低氮水平下的产量低于供试基因型的平均值,高氮水平下则相反,位于图中的 II 区,高氮高效型中稻包括大晴稻和来安稻等 15 个基因型,高氮高效型晚稻包括 3010 和 4019 等 19 个基因型。(3)低氮高效型(Efficient-inefficient),此类基因型在低氮水平下的产量高于供试基因型的平均值,高氮水平下则相反,位于图中的 III 区,低氮高效型中稻包括黑壳子稻和来安 19 等 9 个基因型,低氮高效型晚稻包括锡稻 11 和秀水 63 等 15 个基因型。(4)双低效型(Inefficient-inefficient),此类基因型在低氮和高氮水平下的产量均低于供试基因型的平均值,位于图中的 IV 区,双低效型中稻包括沈农 1033 和 BR36 等 27 个基因型,双低效型晚稻包括 Elio 和黄金糯等 37 个基因型。也就是

说,双高效型水稻基因型即为氮高效水稻基因型,双低效水稻基因型即为氮低效基因型,而高氮高效型和低氮高效型水稻则落入中间型,其产量水平处于氮高效、氮低效型水稻基因型中间。

2.3 不同氮效率水稻的氮吸收和生理利用效率的基因型差异

不同基因型水稻产量的差异是由氮吸收和生理利用效率共同引起的。表 3 列出了不同生育期水稻基因型在两个施氮水平下水稻吸氮量和氮生理利用效率对产量的贡献率。从表 3 可以看出,对中熟型水稻而言,在两个施氮水平下均是氮生理利用效率对产量的贡献率远大于吸氮量对产量的贡献;对晚熟型水稻而言,在不施氮肥条件下吸氮量对产量的贡献率为 0.388,小于氮生理利用效率的贡献率。随着施氮量的增加,吸氮量对产量的贡献率随之增加到 0.552,超过了氮生理利用效率的贡献率。由此可以推测,氮积累量和氮生理利用效率对产量的贡献率随着水稻的生育期和施氮水平的不同而不同。由于中熟型水稻的生育期较短,在较短的生育期内水稻吸收的氮有限,所以吸收到水稻体内的氮能否高效利用就关系到产量的高低,所以在不同的施氮水平下氮生理利用效率均对产量起到决定性的作用。而晚熟型水稻的生育期长,在不施氮条件下由于土壤中可供水稻吸收的氮量有限,所以水稻体内的氮生理利用效率对产量起到决定性的作用;当施氮量为 180 kg hm^{-2} 时,土壤中可供水稻吸收的氮量较为充足,而且其生育期较长,所以水稻吸收的氮量对产量的贡献率增加,甚至超过了氮生理利用效率。

表 3 构成性状对水稻产量平方和的贡献率

Table 3 Contribution of component traits to the sum of square of grain yield

构成性状 Component trait		表达式 Expression	\log_{10}	CK	+N
		SS_X, Y, SY^2			
	产量 Grain yield	Gv	Y		
中稻	吸氮量 N accumulation	Na	X_1	0.240	0.245
Semilate rice	氮生理利用效率 Physiological N use efficiency	Gw/ Na	X_2	0.760	0.755
晚稻	吸氮量 N accumulation	Na	X_1	0.388	0.552
Late rice	氮生理利用效率 Physiological N use efficiency	Gw/ Na	X_2	0.612	0.448

表 4 列出了中熟型和晚熟型水稻中氮高效和氮低效两个类群水稻氮吸收和生理利用效率的基因型差异。从表 4 可看出,在中熟和晚熟型水稻中不同氮效率水稻的产量、氮吸收和生理利用效率存在着显著差异。氮高效水稻的产量高因为其具有高的氮吸收量和生理利用效率。分析不同氮效率水稻的氮

吸收量可发现,不同氮效率水稻秸秆氮积累量差异不明显,但是氮高效水稻籽粒氮积累量明显高于氮低效水稻;从表 4 还可看出,氮高效水稻秸秆和籽粒氮浓度均低于氮低效水稻,进一步的相关分析表明,177 个水稻基因型的氮生理利用效率与秸秆和籽粒的氮浓度均呈极显著的负相关关系,其中氮生理利

表 4 不同氮效率水稻吸收与生理利用氮的基因型差异

Table 4 N uptake and physiological use efficiency of rice plants different in genotype and NUE

参数 Parameter	氮肥 N rate	中稻 Semilate rice		晚稻 Late rice	
		氮高效型	氮低效型	氮高效型	氮低效型
		High NUE	Low NUE	High NUE	Low NUE
产量 Grain yield (g m ⁻²)	CK	285	140	493	329
	+N	497	273	567	386
生物量 Biomass accumulation (g m ⁻²)	CK	831	609	1 038	781
	+N	1 266	901	1 333	1 021
吸氮量 N accumulation (g m ⁻²)	CK	8.46	6.66	8.75	7.52
	+N	15.0	12.8	14.4	12.2
氮生理利用效率 Physiological N use efficiency (g g ⁻¹)	CK	34	21	57	44
	+N	33	22	39	32
秸秆氮浓度 N concentration in straw (%)	CK	0.85	0.97	0.65	0.81
	+N	0.97	1.28	0.92	1.04
籽粒氮浓度 N concentration in grain (%)	CK	1.36	1.51	1.08	1.19
	+N	1.53	1.78	1.32	1.47
秸秆氮量 N accumulation in straw (g m ⁻²)	CK	4.65	4.56	3.53	3.68
	+N	7.42	8.06	7.20	6.71
籽粒氮量 N accumulation in grain (g m ⁻²)	CK	3.82	2.70	5.22	3.84
	+N	7.58	4.78	7.22	5.60

表 5 典型的氮高效和氮低效水稻基因型的产量、吸氮量和氮生理利用效率

Table 5 Grain yield, N uptake and physiological N use efficiency of typical genotypes high and low in N use efficiency

类型 Type	基因型 Genotype	产量 Grain yield (g m ⁻²)		吸氮量 N accumulation (g m ⁻²)		氮生理利用效率 Physiological N use efficiency (g g ⁻¹)	
		CK	+N	CK	+N	CK	+N
		中稻 Semilate rice					
氮高效型	玉田大白芒 Yutian dabaimang	358 ±36	575 ±65	10.5 ±1.0	16.7 ±1.6	34.0 ±4.2	34.4 ±2.3
High NUE	80-4	311 ±23	532 ±58	9.43 ±0.82	15.3 ±1.5	33.0 ±2.9	34.7 ±3.0
	米粳 199 Mijing 199	402 ±25	701 ±56	11.0 ±0.9	17.9 ±1.7	36.4 ±2.7	39.2 ±2.3
	Carharoli	325 ±23	707 ±45	9.66 ±0.57	18.1 ±1.5	33.6 ±2.3	39.1 ±2.9
	秀水 48 Xiushui 48	406 ±19	595 ±54	8.75 ±0.75	19.1 ±1.6	46.4 ±4.2	31.1 ±2.5
	信粳 6 Xinjing 6	388 ±20	444 ±41	9.32 ±0.58	14.6 ±1.2	41.6 ±4.0	30.4 ±2.9
氮低效型	意大利 8 号 Italy 8	134 ±12	151 ±12	7.44 ±0.36	14.4 ±1.3	18.0 ±0.9	10.5 ±0.2
Low NUE	Drago	184 ±14	176 ±15	9.32 ±0.86	12.8 ±1.0	19.7 ±0.8	13.8 ±0.1
	BR36	99 ±10	122 ±13	6.22 ±0.78	11.4 ±1.2	15.9 ±0.6	10.7 ±0.1
	沈农 1033 Shennong 1033	125 ±14	193 ±14	5.12 ±0.65	8.15 ±0.98	24.4 ±0.8	21.0 ±0.1
晚稻 Late rice							
氮高效型	4007	536 ±23	636 ±36	10.8 ±0.6	15.7 ±1.2	49.5 ±4.5	40.6 ±3.9
High NUE	黔育 421 Qianyu 421	565 ±36	891 ±47	10.3 ±1.0	23.6 ±1.9	55.0 ±5.2	37.7 ±2.3
	3023	584 ±47	634 ±25	11.0 ±1.1	19.8 ±1.7	52.9 ±5.1	32.1 ±2.6
	南光 Nanguang	503 ±45	621 ±65	8.75 ±0.78	13.8 ±1.5	57.5 ±5.6	45.1 ±4.2
	武运粳 7 号 Wuyunjing 7	596 ±54	631 ±75	9.14 ±0.89	15.7 ±1.5	65.2 ±6.5	40.3 ±4.2
	云粳 38 Yunjing 38	607 ±58	743 ±56	10.3 ±1.0	20.8 ±2.0	59.2 ±5.3	35.6 ±3.2
氮低效型	黄金糯 Huangjinnuo	275 ±15	312 ±25	7.16 ±0.45	13.7 ±1.2	38.4 ±2.3	22.8 ±1.2
Low NUE	辽粳 326 Liaojing 326	218 ±12	319 ±24	7.22 ±0.65	12.7 ±1.4	30.2 ±2.9	25.2 ±2.1
	M204	349 ±26	305 ±15	8.94 ±0.78	13.8 ±1.4	39.0 ±3.1	22.5 ±2.2
	Elio	209 ±12	302 ±25	8.92 ±1.11	14.6 ±1.5	23.4 ±1.2	20.6 ±1.9

用效率与秸秆氮浓度的相关系数要大于与籽粒氮浓度相关系数。同时从表 2 也可看出,秸秆氮浓度的变异系数无论是在中熟型水稻还是在晚熟型水稻中均明显大于籽粒氮浓度,说明不同基因型间的秸秆氮浓度变异比较大。这表明氮高效型的水稻基因型的籽粒和秸秆氮浓度均较低,其中秸秆氮浓度低可较好地表征水稻具有较高的氮生理利用效率。从表 4 还可看出,氮高效水稻的生物量均明显高于氮低效水稻。由此可推断,氮高效水稻不仅吸收氮能力强,而且其体内的氮浓度较低,即单位吸氮量形成的生物产量和籽粒产量高;同时氮高效基因型吸收的氮向籽粒转运的能力强。

从表 5 中列出的典型的氮高效和氮低效的水稻基因型来看,与氮低效水稻基因型相比,氮高效水稻基因型具有高的吸氮量和高的氮生理利用效率,从而具有高的产量。但情况并不完全一致,中熟型水稻中氮高效基因型 80-4、秀水 48 和信粳 6 号和氮低效稻基因型 Dargo 在不施氮条件下植株总吸氮量没有差异,但其产量却差异显著。同样的情况也存在于晚熟型水稻中,氮高效基因型南光、武运粳 7 号和氮低效基因型 Elio 在两个氮处理下吸氮量均没有差异,但产量同样差异显著。这表明导致其氮效率不同的原因主要来自于对体内氮生理利用效率的差异。综上所述,在不同供氮水平下氮高效水稻的产量差异主要来自于氮吸收和生理利用效率的差异,但不同的水稻基因型氮高效的生理机制并不相同。

3 结 论

氮素利用效率的定义和类型的划分是一个复杂的问题,许多研究者对多个作物品种进行了研究。Moll 等^[4]将氮素利用效率定义为介质中单位供氮量所得到的籽粒产量。由于土壤供氮量较难计算,Ladha 等^[14,15]将氮素利用效率相对地定义为同一供氮水平下的作物产量,由于作物对氮肥的反应不同,那么可能出现作物在不同的供氮水平时氮效率不一致的现象,容易造成混淆。所以在评价作物的氮素利用效率时应同时考虑静态和动态两个指标,静态指标是指介质供氮量较低时作物的氮素利用效率或产量,动态指标是指介质供氮量增加时作物的氮素利用效率或产量,两个指标包含了在动态的供氮水平下作物生物量或产量的变化情况^[16]。这样氮效率的概念才比较完整和科学。根据水稻在两个施氮水平下的产量水平将水稻分为四个类型:双高效型、

高氮高效型、双低效型和低氮高效型。其中双高效型水稻基因型即为氮高效水稻基因型,双低效水稻基因型即为氮低效基因型,而高氮高效型和低氮高效型水稻基因型则落入中间型,其产量水平处于氮高效型与氮低效型水稻之间。

不同基因型水稻的产量、吸氮量和氮生理利用效率随供氮水平的不同而变化。不同基因型水稻产量的差异主要来自于氮吸收和氮生理利用效率的差异。有关吸氮量和氮生理利用效率对水稻产量贡献率高低的争议很大。从本试验的结果分析发现,吸氮量和生理利用效率对产量的贡献率首先受到水稻生育期的影响,对于生育期较短的水稻无论供氮水平高低均是氮生理利用效率对产量具有决定作用;对于生育期较长的水稻其产量在供氮水平较低时是氮生理利用效率起决定作用,在高的供氮水平下则是吸氮量起决定作用。氮高效基因型可描述为在不同供氮水平下均有较高的产量,同时意味着氮高效基因型能吸收大量的氮或有较高的氮生理利用效率。不同的基因型间氮高效的生理机制差异较大。水稻成熟时较低的秸秆氮浓度表明其具有较高的氮生理利用效率。与吸氮量相比,氮生理利用效率是一个相对稳定的筛选氮效率的指标。应该进一步在不同地点、不同施氮水平下深入研究不同基因型水稻产量、吸氮量和氮生理利用效率的表现,以期对不同氮效率的水稻基因型的生理机制做进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1 095 ~ 1 103. Peng S B, Huang J L, Zhong X H, et al. Research strategy in improving fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated rice in China (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1 095 ~ 1 103
- [2] 闫德智,王德建,林静慧. 太湖地区氮肥用量对土壤供氮、水稻吸氮和地下水的的影响. 土壤学报, 2005, 42(3): 440 ~ 446. Yan D Z, Wang D J, Lin J H. Effects of fertilizer-N application rate on soil N supply, rice N uptake and groundwater in Taihu region (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(3): 440 ~ 446
- [3] 赵其国. 土壤与环境问题国际研究概况及其发展趋势——参加第 16 届国际土壤学会专题综述. 土壤, 1998, 30(6): 281 ~ 310. Zhao Q G. International study and trend on soil and environment issue - Special review in 16th International Soil Conference (In Chinese). Soils, 1998, 30(6): 281 ~ 310
- [4] Moll R H, Kamprath E J, Jackson W A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. Agronomy J., 1982, 74: 562 ~ 564
- [5] 蒋彭炎,洪晓富,冯来定,等. 水稻中后期成穗率与后期群

- 体光合效率的关系. 中国农业科学, 1994, 27(6): 8~14. Jiang P Y, Hong X F, Feng L D, *et al.* Relation between percentage of ear-bearing of colony in the middle phase and photosynthesis efficiency in the late in rice (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 1994, 27(6): 8~14
- [6] 江立庚, 曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径. 中国水稻科学, 2002, 16(3): 261~264. Jiang L G, Cao W X. Physiological mechanism and approaches for efficient nitrogen utilization in rice (In Chinese). *Chinese J. Rice Sci.*, 2002, 16(3): 261~264
- [7] 江立庚, 戴廷波, 韦善清, 等. 南方水稻氮素吸收与利用效率的基因型差异及评价. 植物生态学报, 2003, 27(4): 466~471. Jiang L G, Dai T B, Wei S Q, *et al.* Genotypic differences and valuation in nitrogen uptake and utilization efficiency in rice (In Chinese). *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, 27(4): 466~471
- [8] Tirol-Padre A, Lagha J K, Singh U, *et al.* Grain yield performance of rice genotypes at suboptimal levels of soil N as affected by N uptake and utilization efficiency. *Field Crops Res.*, 1996, 46: 127~143
- [9] Singh U, Lagha J K, Castillo E G, *et al.* Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium and long-duration rice. *Field Crops Res.*, 1998, 58: 35~53
- [10] Koutroubasa S D, Ntanosb D A. Genotypic differences for grain yield and nitrogen utilization in Indica and Japonica rice under Mediterranean conditions. *Field Crops Res.*, 2003, 83: 251~260
- [11] 张云桥, 吴荣生, 蒋宁, 等. 水稻的氮素利用效率与品种类型的关系. 植物生理学通讯, 1989(2): 45~47. Zhang Y Q, Wu R S, Jiang N, *et al.* Relation between nitrogen use efficiency and genotype (In Chinese). *Plant Physiology Communications*, 1989(2): 45~47
- [12] 单玉华, 王余龙, 山本由德. 常规籼稻与杂交籼稻氮素利用效率的差异. 江苏农业研究, 2001, 22(1): 12~15. Shan Y H, Wang Y L, Yamamoto Y, *et al.* Genotypic difference of nitrogen use efficiency in various types of indica rice (In Chinese). *Jiangsu Agricultural Research*, 2001, 22(1): 12~15
- [13] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 146~315. Lu R K. ed. *Analytical Methods of Soil and Agricultural Chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. 146~315
- [14] Ladha J K, Kirk G J D, Bennett J, *et al.* Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved lowland rice germplasm. *Field Crops Res.*, 1998, 83: 41~71
- [15] De Datta S K. Improving nitrogen fertilizer efficiency in lowland rice in tropical Asia. *Fertilizer Res.*, 1986, 9: 171~186
- [16] 刘建安, 米国华, 张福锁. 不同基因型玉米氮效率差异的比较研究. 农业生物技术学报, 1999, 7(3): 248~254. Liu J A, Mi G H, Zhang F S. Difference in nitrogen efficiency among maize genotypes (In Chinese). *J. of Agricultural Biotechnology*, 1999, 7(3): 248~254

VARIATION OF NITROGEN USE EFFICIENCY OF RICE DIFFERENT IN GENOTYPE AND ITS EVALUATION

Zhang Yali Fan Jianbo Duan Yinghua Wang Dongsheng Ye Liting Shen Qirong[†]
(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract N use efficiency of rice is key to its overall yield potential, and efforts to improve the key potential must be guided by a thorough understanding of the process that governs N use efficiency. Field experiment was conducted to assess differences in grain yield, N accumulation, and N physiological use efficiency between 177 genotypes of rice japonica (71 semilate varieties (130~150 d) and 106 late varieties (151~172 d) under two levels of N supply (0 and 180 kg hm⁻²) in 2003. Grain yield and N accumulation increased with the N rate, while physiological N use efficiency decreased. Significant differences in grain yield, N uptake and N physiological use efficiency were observed between genotypes within the same variety group under the same N application rate. Based on grain yield under two N rates, genotypes within each group were divided into four types, such as efficient-efficient, inefficient-efficient, inefficient-inefficient, and efficient-inefficient. High N use efficiency (NUE) cultivars produced high yields when N was applied, and low NUE cultivars low yields. Thus genotypes which have promising traits for improved N uptake and N physiological use efficiency are identified. Those with higher N physiological use efficiency were lower in N concentration in straw at maturity. Further study is needed to elucidate mechanisms involved in high N uptake and N physiological use efficiency.

Key words Rice; N use efficiency; Physiological N use efficiency; Variation; Evaluation